

基于 NCLMS 的 QPSK-PCMA 系统仿真分析

黄 波

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:载波成对多址接入(Paired Carrier Multiple Access,PCMA)允许卫星通信上下行链路在时域和频域完全重叠,从而大幅提升卫星频谱利用效率,在卫星通信中具有非常重要的研究价值和意义。考虑到 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)调制方式在卫星通信中的广泛应用,将归一化复数最小均方滤波器(Normalized Complex Least Mean Square,NCLMS)用于 PCMA 自干扰抵消,将划分频率槽技术以及超前、即时、滞后精确时延估计技术分别用于频率和时延的粗捕和精捕阶段,重点研究了 NCLMS 学习步长和 NCLMS 环路有限抽头响应滤波器 FIR(Finite Impulse Response)抽头阶数对自干扰抵消结果的影响,并进行了 Matlab 仿真实验。仿真结果表明:NCLMS 自适应学习步长对自干扰抵消结果影响较大,学习步长取 2^{-12} 与学习步长取 2^{-16} 相比,信噪比恶化约 1.5 dB;5 阶抽头 NCLMS 环路 FIR 滤波器即可达到很好的自干扰抵消性能,继续增加 FIR 滤波器抽头阶数意义不大。

关键词:卫星通信;载波成对多址接入;自干扰抵消;归一化最小均方误差

中图分类号:V443

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)03-0155-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.03.032

Simulation and Analysis of NCLMS-based QPSK-PCMA System

HUANG Bo

(College of Telecommunications & Information Engineering,Nanjing University of
Posts and Telecommunications,Nanjing 210003,China)

Abstract:PCMA (Paired Carrier Multiple Access) allows up and down links to use the same spectrum at the same time, which can greatly improve the spectrum efficiency and has important significance in satellite communications. As QPSK is commonly used in satellite communications, a self-interference cancellation method based on NCLMS (Normalized Complex Least Mean Square) is proposed. The dividing frequency slot technique and the Early-Prompt-Late technique for accurate time delay estimation are used respectively in the coarse and precise estimation stages of the frequency and time delay. The effect of NCLMS learning step and NCLMS loop FIR (Finite Impulse Response) taps number on self-interference cancellation is mainly investigated and simulated with Matlab. The simulation results show that the step length for NCLMS self-adaptive learning will impress the results of self-interference cancellation, comparing with 2^{-16} the step length of 2^{-12} having made SNR deteriorated about 1.4 dB, and that PCMA performance is good enough for self-interference cancellation with five NCLMS loop FIR filter taps, thus there is no need to increase filter taps number.

Key words:satellite communications;PCMA;self-interference cancellation;NCLMS

0 引 言

载波成对多址接入技术(Paired Carrier Multiple Access,PCMA)允许双向卫星通信链路在时间和频谱上进行重叠,对提高卫星频谱资源利用率具有非常重要的意义,因而在卫星通信系统中得到了大量的研究和应用。

PCMA 系统的关键是自干扰抵消,也就是利用自身发射的信息构建抵消信号,抵消接收到的下行信号

中返回的自己发射的信号。1998 年,ViaSat 公司的 Mark Dankberg 等提出了 PCMA 的思想^[1],并申请了自干扰抵消技术相关的专利^[2-3]。该公司的 Blount 等也申请了系列关于自干扰抵消的技术专利^[4-6],并在 ViaSat 公司的相应产品中得到了应用^[7]。

最小均方滤波器(Least Mean Square,LMS)以其成熟、稳定和实现简单性,在自干扰消除技术中应用广泛^[8-20]。考虑到 QPSK 调制技术在卫星通信应用中的

收稿日期:2016-04-26

修回日期:2016-08-12

网络出版时间:2017-02-17

基金项目:江苏省产学研前瞻性研究项目(BY2015011-01);南京邮电大学引进人才启动基金(NY211036)

作者简介:黄 波(1975-),男,讲师,博士,研究方向为卫星通信与导航。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170217.1630.060.html>

广泛性,QPSK生成的是I、Q两路信号合成的正交复信号,在文献[8]的自干扰抵消系统架构基础上,文中将归一化复数最小均方滤波器(Normalized Complex Least Mean Square,NCLMS)用于PCMA的自干扰抵消中,并重点研究了NCLMS算法中学习步长以及NCLMS环路FIR(Finite Impulse Response)滤波器抽头阶数对QPSK调制下的PCMA自干扰抵消效果的

影响。

1 基于NCLMS的自干扰抵消方案

1.1 系统总体设计方案

QPSK调制方式下,借鉴文献[8],基于NCLMS的PCMA系统框图如图1所示。

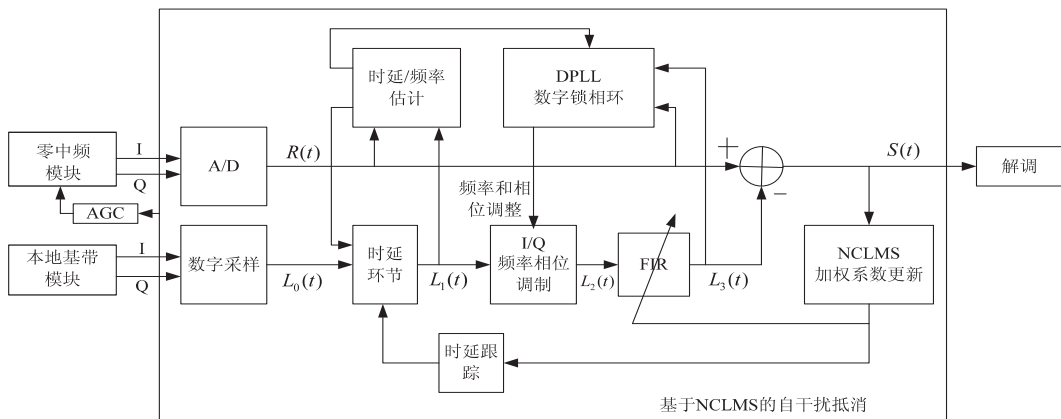


图1 基于NCLMS的自干扰抵消系统

从射频(Radio Frequency, RF)通过下变频变换过来的零中频(Zero Intermediate Frequency, ZIF) I/Q两路正交模拟信号经过A/D采样后,产生接收的复信号 $R(t)$;本地产生的I/Q两路基带数字信号,经过数字采样后,合成一路复信号 $L_0(t)$; $R(t)$ 和 $L_0(t)$ 两路信号输入时延/频偏联合估计模块,经过粗捕和精捕过程,获得较为精确的初始时延和频偏; $L_0(t)$ 经过延时单元,获得经过延时的本地第一级复现信号 $L_1(t)$ 。

初始化NCLMS环路FIR滤波器,启动数字锁相环(DPLL),开始频差和相位的联合捕获与跟踪,获得经过频率和相位调整之后的复现信号 $L_2(t)$ 和 $L_3(t)$ 。当DPLL锁定之后,启动NCLMS自适应跟踪,启动延时跟踪单元进行精细的时延、相位和幅度的跟踪。

接收信号 $R(t)$ 减去本地复现的信号 $L_3(t)$,得到自干扰抵消后的信号 $S(t)$, $S(t)$ 经过解调,获得对方发送过来的数据。

NCLMS自适应滤波器能够借助FIR群时延,完成小于一个采样间隔的延时调整,而且能够完成更加精细的幅度和相位的跟踪;DPLL能够完成精确的频率和相位的跟踪工作。精确的时延、频率和相位估计,是获得良好自干扰抵消的基础。

1.2 NCLMS环路设计方案

将NCLMS自适应滤波器环路从图1中剥离出来,如图2所示。

其中,5阶的FIR滤波器在 n 时刻的输出为:

$$y_n = w_{-2}x_{n+2} + w_{-1}x_{n+1} + w_0x_n + w_1x_{n-1} + w_2x_{n-2} \quad (1)$$

初始FIR滤波器系数 $\{w_{-2}, w_{-1}, w_0, w_1, w_2\}$ 被初始

化成SINC脉冲函数值。如果想要更高的精度,可扩展抽头数目,但一般没有必要。

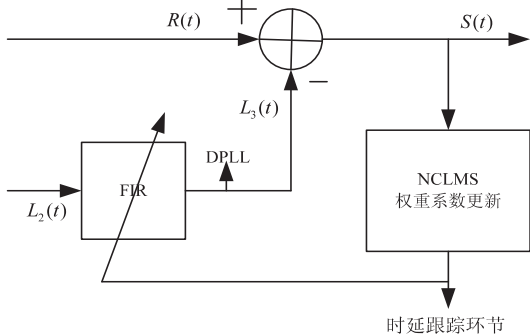


图2 NCLMS自适应滤波器环路

因为采用的是QPSK调制方式, $L_3(t)$ 和 $R(t)$ 都是复信号。因此在实际中,采用的是归一化复数LMS,简称为NCLMS,算法步骤参见文献[19-20],限于篇幅不再讲述。

1.3 时延和频差的联合估计设计方案

时延和频差的捕获是一个二维搜索过程,两者中任何一个偏差过大,信号都不会表现出很好的相关性。

而时延和频差的联合估计常用的算法是相关函数的自然推广,也就是求解下面的模糊函数^[8]:

$$A(\tau, f) = \int_0^T s_1(t) s_2^*(t + \tau) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (2)$$

其中, τ, f 分别表示时延和频差; $s_1(t), s_2(t)$ 是包含同一成分的两个信号的包络,使得 $|A(\tau, f)|$ 达到峰值的 τ, f 就是要找的时延和频差。因此,整个捕获过程就集中在以上模糊函数的求解上。

(1)粗捕。

粗捕过程提供初始的参数估计,以进入精确的捕获过程或者说跟踪过程。在粗捕阶段,采用划分频率槽的方法,用短的预检测积分时间,并采用非相干求和方法,获取有效的信噪比。

(2)精捕。
在频率粗估计和延迟估计的基础上,通过对接收

信号 $R(t)$ 取超前、即时、滞后相对延迟,与本地复现信号相干累加,能够得到不同的相干值,存储这些相干值分别形成序列,其包络将反映频率估计的剩余分量。通过 FFT 处理,可以求出频率精细值,这就是频率精确估计的基本过程。精确捕获过程如图 3 所示。

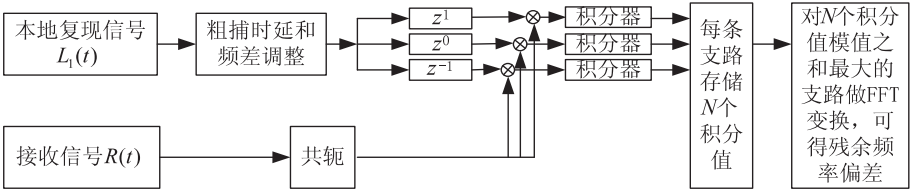


图 3 频差的精确估计

2 基于 Matlab 的系统仿真分析

采用 Matlab R2012b 作为系统仿真工具,仿真中调制方式为 QPSK,数据速率设置为 1 Mbps,码成型滤波器采用的是升余弦滚降滤波器,接收端采用了相应的匹配滤波器。

2.1 仿真系统总体架构

仿真系统的整体架构如图 4 所示。

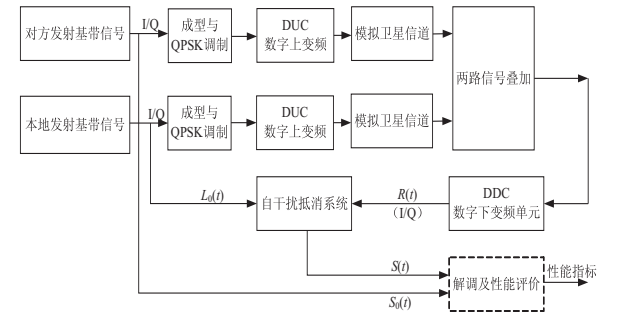


图 4 系统仿真架构

整个仿真系统分为三大模块:自干扰抵消模块、ZIF 信号 $R(t)$ 模拟产生模块以及性能指标评价模块。

2.2 自干扰抵消仿真结果及分析

当 DPLL 锁定之后,启动 NCLMS 自适应滤波器环路,完成时延的精细化跟踪,并完成对消过程。在不同的信噪比条件下,更改 FIR 抽头数、学习步长,仿真结果见表 1。

根据表 1,不难得出以下结论:

- (1)FIR 抽头数为 5 时,自干扰抵消的结果已经能达到理想的效果。再增加滤波器长度,对消结果几无差别,意义不大。
- (2)对学习步长比较敏感。 2^{-12} 到 2^{-16} 变化,引起的对消前后信噪比之差在 1.5 dB 左右。
- (3)滤波器长度和学习步长确定之后,随着信噪比的降低,对消前后信噪比之差稍微变小,也就是自干扰抵消后影响数据。

表 1 仿真结果统计表

原信噪比/dB	FIR 抽头	学习步长	信噪比恶化/dB
11	3	2^{-16}	≤ 4.61
14	5	2^{-16}	≤ 0.43
11	5	2^{-16}	≤ 0.27
8	5	2^{-16}	≤ 0.11
5	5	2^{-16}	≤ 0.06
14	7	2^{-16}	≤ 0.40
11	7	2^{-16}	≤ 0.22
8	7	2^{-16}	≤ 0.10
5	7	2^{-16}	≤ 0.06
11	7	2^{-12}	≤ 1.6

3 结束语

针对 QPSK 调制下的 PCMA 卫星通信系统,采用 NCLMS 进行自干扰对消,并将时延和频差的联合估计过程分为粗捕和精捕两个阶段。粗捕阶段采用划分频率槽技术,精捕阶段采用超前、即时和滞后精确时延确定技术。Matlab 仿真结果表明,当 NCLMS 环路 FIR 抽头数为 5,学习步长取 2^{-16} 时,能达到较好的对消效果,对消之后引入的信噪比恶化低于 0.5 dB,并且随着接收信号信噪比的降低,对消之后引入的信噪比恶化越来越小。

参考文献:

[1] Dankberg M D. Paired Carrier Multiple Access (PCMA) for satellite communications [C]//Pacific telecommunications conference. [s. l.]:[s. n.],1998:787-791.

[2] Dankberg M D, Miller M J, Mulligan M G. Self-interference cancellation for two-party relayed communication; US, 5596439A[P]. 1997.

[3] Dankberg M D, Miller M J, Mulligan M G. Self-interference cancellation for relayed communication networks; US, 6011952 [P]. 2000.

- [4] Blount R, Irvine D H. Multi-channel self-interference cancellation method and apparatus for relayed communication; US, 6725017 [P]. 2004.
- [5] Blount R, Becker D W, O'Neill J H. Self-interference removal using converter compensation in a relayed communication system; US, 6996164 [P]. 2006.
- [6] Blount R, Miller M, Murphy J. Relayed communication with versatile self-interference cancellation; US, 7349505 [P]. 2008.
- [7] ViaSat 公司 PCMA 产品技术手册[EB/OL]. 2016-04-16. <http://www.satcomresources.com/ViaSat-PCMA-Paired-Carrier-Multiple-Access>.
- [8] Collins G D, Anair D L, Michael J R. Adaptive canceller for frequency reuse systems; US, 20020197958 A1 [P]. 2002.
- [9] Comtech Doubletalk 技术文档[EB/OL]. 2016-04-26. <http://www.comtechefdata.com/technologies/doubletalk>.
- [10] Lee J H. Self-interference cancellation using phase rotation in full-duplex wireless [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(9): 4421-4429.
- [11] Askar R, Kaiser T, Schubert B, et al. Active self-interference cancellation mechanism for full-duplex wireless transceivers [C]//9th international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications. [s. l.]: IEEE, 2014: 539-544.
- [12] Hong S, Brand J, Choi J, et al. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 114-121.
- [13] Korpi D, Anttila L, Syrjala V, et al. Widely-linear digital self-interference cancellation in direct-conversion full-duplex transceiver [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(9): 1674-1687.
- [14] Jindal N, Shi J, Sundararajan S, et al. Self-interference cancellation; US, 20150055568 [P]. 2015.
- [15] Masmoudi A, Le-Ngoc T. A maximum-likelihood channel estimator for self-interference cancellation in full-duplex systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 135(1450): 1.
- [16] 陈绍贺, 万坚, 涂世龙, 等. PCMA 系统中干扰信号时延估计新算法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21): 5774-5777.
- [17] 杨欣, 黄焱, 张冬玲, 等. 基于联合特征参数的 PCMA 信号调制识别算法 [J]. 信息工程大学学报, 2013, 14(1): 78-83.
- [18] 赵宇峰, 曹玉健, 戴旭初. 单信道混合数字通信信号的时延估计方法 [J]. 信号处理, 2015, 31(2): 161-169.
- [19] Widrow B, McCool J, Ball M. The complex LMS algorithm [J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63(4): 719-720.
- [20] Simon H. Adaptive filter theory [M]. 5th ed. USA: Pearson, 2013: 315-335.

(上接第 154 页)

电子科技大学, 2013.

- [4] 韩磊. 基于单兵人体发电装置的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [5] 尹军茂. 穿戴式下肢外骨骼机构分析与设计 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [6] 刘红俊, 陈定方, 陶孟仑, 等. 压电式振动能量采集器的响应特性与实验研究 [J]. 机械设计与研究, 2015, 31(6): 28-30.
- [7] 马新芳. 便携式设备电源管理研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2008.
- [8] Xie L, Cai M. An in-shoe harvester with motion magnification for scavenging energy from human foot strike [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 1.
- [9] Yun J, Patel S N, Reynolds M S, et al. Design and performance of an optimal inertial power harvester for human-powered devices [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(5): 669-683.
- [10] Chen R, Ren L, Xia H, et al. Energy harvesting performance of a dandelion-like multidirectional piezoelectric vibration energy harvester [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 230: 1-8.
- [11] Abdi H, Mohajer N, Nahavandi S. Human passive motions and a user-friendly energy harvesting system [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 25(8): 923-936.
- [12] Yang W, Chen J, Zhu G, et al. Harvesting energy from the natural vibration of human walking [J]. Acs Nano, 2013, 7(12): 11317-11324.
- [13] Fafoutis X, Sorensen T, Madsen J. Energy harvesting-wireless sensor networks for indoors applications using IEEE 802.11 [J]. Procedia Computer Science, 2014, 32: 991-996.
- [14] Kim D G, Yun S N, Ham Y B. Energy harvesting strategy piezoelectric element driven by vibration method [J]. Wireless Sensor Network, 2014, 2(2): 100-107.